

Krzysztof Strzecha*, Anna Fabijańska*, Dominik Sankowski*

Nowe algorytmy segmentacji w wysokotemperaturowym przemysłowym systemie analizy obrazów

1. Wprowadzenie

Cyfrowe metody przetwarzania i analizy obrazów cieszą się obecnie bardzo dużym i ciągle rosnącym zainteresowaniem. Znaczący wzrost możliwości obliczeniowych współczesnych komputerów pozwala na ich praktyczną implementację, także w systemach czasu rzeczywistego. Jednocześnie, wraz z rozwojem nowoczesnych technologii zwiększa się różnorodność ich możliwych zastosowań w nowoczesnej nauce i technice.

W wielu przemysłowych procesach (m.in. w metalurgii, inżynierii materiałowej i inżynierii powierzchni) dominującą rolę odgrywają zjawiska zachodzące na granicy dwóch faz: ciekłej fazy metalicznej i fazy stałej (stopy metali, ceramika, szkło). Znaczeniu zjawisk na granicach faz w różnych dziedzinach techniki poświęcono szereg monografii i artykułów przeglądowych [1–8].

Podstawowymi wielkościami fizykochemicznymi charakteryzującymi oddziaływanie międzyfazowe są: napięcie powierzchniowe fazy ciekłej oraz skrajny kąt zwilżania podłoża cieczą, a w dalszym etapie: energia adhezji, napięcie międzyfazowe i ewentualnie adsorpcja. Pomiary tych wielkości bazują na geometrycznych właściwościach analizowanej próbki [9–11]. Obecnie, dominującą metodą wyznaczania kąta zwilżania oraz napięcia powierzchniowego jest metoda optyczna, polegająca na ciągłej obserwacji kształtu próbki i ręcznym lub fotograficznym rejestrowaniu zmian jej profilu w funkcji temperatury. Zarejestrowane profile analizowane są następnie przez wykwalifikowanego specjalistę, który metodami graficznymi dokonuje pomiaru podstawowych parametrów geometrycznych próbki i na ich podstawie oblicza wartości mierzonych wielkości. Systemy pomiarowe tego typu posiadają szereg wad, m.in.: niezwykle pracochłonny i uciążliwy pomiar, wymagający od operatora ciągłej wytężonej uwagi, jak również istotny wpływ czynnika ludzkiego na wyniki pomiaru.

W świetle powyższych uwag, celowe wydało się zautomatyzowanie procesu pomiarowego. W Katedrze Informatyki Stosowanej Politechniki Łódzkiej przy współpracy z Prze-

* Katedra Informatyki Stosowanej, Politechnika Łódzka

myślowym Instytutem Elektroniki w Warszawie oraz Instytutem Spajania Politechniki Warszawskiej zaprojektowano i zbudowano skomputeryzowany system pomiarowy do wysokotemperaturowych pomiarów wybranych wartości fizyko-chemicznych charakteryzujących oddziaływanie międzyfazowe – „Thermo-Wet”. W systemie tym, pracę operatora wyeliminowano poprzez zastosowanie algorytmów przetwarzania i analizy obrazów. Analizie poddawane są obrazy próbek uzyskanych za pomocą kamery CCD obserwującej wewnątrz komory grzejnej pieca.

Zaimplementowane w stanowisku „Thermo-Wet” algorytmy wyznaczające właściwości powierzchniowe w dalszym ciągu bazują na pomiarze geometrycznych parametrów analizowanej próbki. Istnieje bardzo silny związek pomiędzy jakością wyznaczenia właściwości geometrycznych próbki a dokładnością pomiarów napięcia powierzchniowego i kąta zwilżania. Kluczowym problemem dla całego procesu pomiarowego jest zatem precyzyjne określenie kształtu próbki. W tym celu obraz poddawany jest segmentacji, czyli podziałowi na obszary odpowiadające poszczególnym, widocznym na obrazie obiektom (próbka wraz z podstawą oraz tło).

Problem segmentacji jest jednym z najczęściej studiowanych zagadnień z zakresu analizy i przetwarzania obrazów, jednak pomimo różnorodnych metod przedstawionych w literaturze przedmiotu [12–14] nie udało się dotychczas stworzyć uniwersalnego algorytmu, który dawałby wystarczająco dokładne wyniki dla szerokiej klasy analizowanych obrazów. W większości, znane algorytmy wykorzystują wiedzę *a priori* o analizowanej scenie i właściwościach urządzeń systemu analizy obrazów. W związku z powyższym, celowe wydało się opracowywanie wysokiej jakości algorytmu segmentacji obrazów monochromatycznych z przeznaczeniem do wykorzystania w systemie wizyjnym stanowiska pomiarowego „Thermo-Wet”.

Dalsza część niniejszego artykułu zawiera opis stanowiska pomiarowego oraz zestawienie i analizę wyników segmentacji obrazów pozyskanych w trakcie procesu pomiarowego. Wykorzystane w trakcie badań metody segmentacji stanowią autorskie modyfikacje znanych z literatury algorytmów.

2. System pomiarowy „Thermo-Wet”

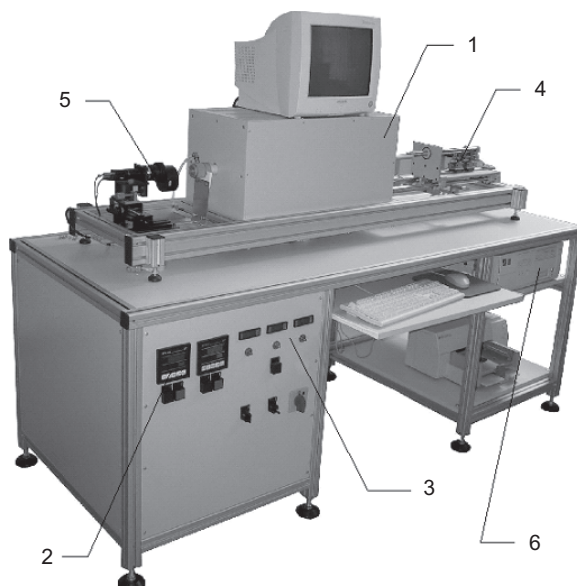
Stanowisko badawcze „Thermo-Wet” umożliwia prowadzenie pomiarów następujących parametrów:

- kąta zwilżania (w tym skrajnego kąta zwilżania);
- napięcia powierzchniowego (energii powierzchniowej);
- energii adhezji;
- napięcia międzyfazowego;
- gęstości badanego materiału w fazie ciekłej.

Parametry te wyznaczone są metodą leżącej kropli dla warunków równowagi termodynamicznej oraz w przypadku stanów nieustalonych w funkcji czasu i temperatury. Badania mogą być prowadzone w kontrolowanej atmosferze, w zakresie temperatur do 1800°C, dla układów międzyfazowych ciało stałe – ciecz oraz ciecz – ciecz dla dwu różnych materiałów.

2.1. Architektura stanowiska pomiarowego

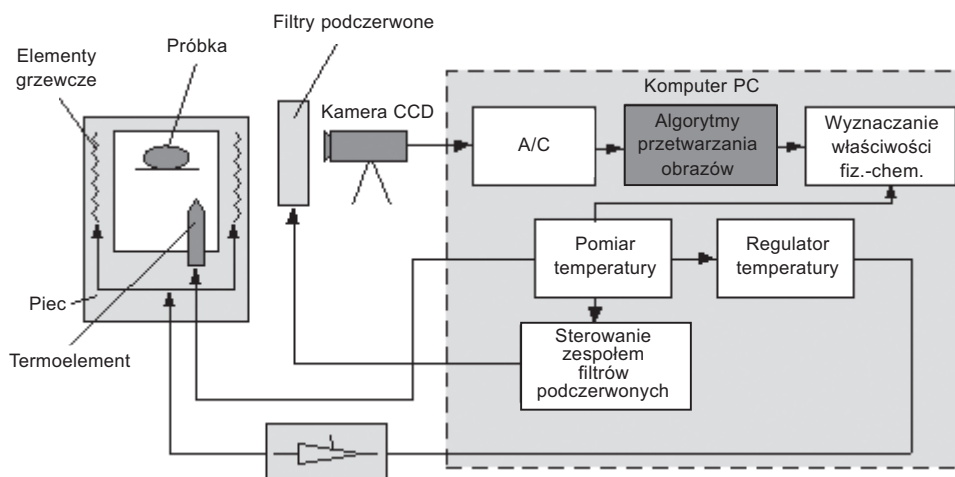
Stanowisko badawcze (rys. 1) składa się z wysokotemperaturowego dwustrefowego pieca elektrycznego (1) wyposażonego w precyzyjny system kaskadowej programowej regulacji temperatury (2) oraz układ zasilania gazami technologicznymi (3), systemu załadowczo-wyładowczego próbki (4), systemu wizyjnego (monochromatyczna miniaturowa kamera CCD wraz z obiektywem o stałej ogniskowej, zmieniacz filtrów i *frame-grabber*) (5) oraz komputera (6) sterującego procesem pomiarowym. Komputer wyposażony jest w system specjalistycznych programów przetwarzania i analizy obrazów, matematycznej obróbki danych oraz edycji i archiwizacji wyników.



Rys. 1. Widok ogólny zautomatyzowanego stanowiska do pomiarów napięcia powierzchniowego i kątów zwilżania (1 – wysokotemperaturowy dwustrefowy piec elektryczny, 2 – precyzyjny system kaskadowej programowej regulacji temperatury, 3 – układ zasilania gazami technologicznymi, 4 – system załadowczo-wyładowczy próbki, 5 – kamera CCD, 6 – komputer sterującym procesem pomiarowym)

Schemat blokowy stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 2. Bardziej szczegółowe informacje na temat architektury stanowiska pomiarowego można znaleźć w [15–17].

W trakcie eksperymentu, próbka badanego materiału umieszczana jest przy użyciu mechanizmu załadowczego we wnętrzu pieca i ogrzewana do temperatury wyższej niż temperatura topnienia. Gdy temperatura wewnątrz pieca jest wystarczająco wysoka, system wizyjny stanowiska pomiarowego ma za zadanie pozyskać obraz próbki i przetworzyć go do postaci cyfrowej. W kolejnych etapach obraz cyfrowy jest filtrowany i poddawany segmentacji.



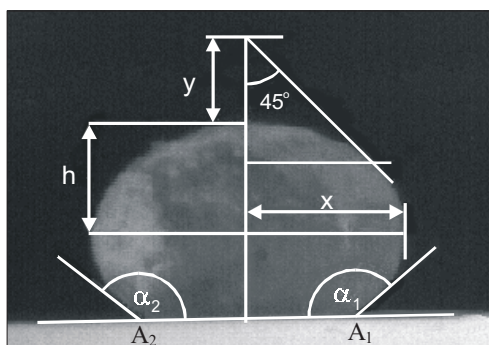
Rys. 2. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego

2.2. Analiza kształtu próbki

Algorytmy analizy obrazów mają na podstawie wyników segmentacji wyznaczyć te własności geometryczne próbki badanego materiału, które są niezbędne do obliczenia napięcia powierzchniowego oraz kąta zwilżania.

Na rysunku 3 przedstawiono kroplę cieczy spoczywającą na płaskim podłożu z zaznaczonymi mierzonymi parametrami geometrycznymi. Notacja na rysunku jest następująca:

- x, y, h – parametry geometryczne niezbędne do wyznaczenia napięcia powierzchniowego,
- A_1, A_2 – punkty przecięcia aproksymowanego profilu próbki z linią prostą stanowiącą górną krawędź podstawy,
- α_1, α_2 – „lewy” i „prawy” kąt zwilżania.



Rys. 3. Przykładowe zdjęcie wykonane podczas procesu pomiarowego z zaznaczonymi mierzonymi parametrami geometrycznymi próbki

Zgodnie z rysunkiem 3, napięcie powierzchniowe σ może być wyznaczone z równania [9]

$$\sigma = g\Delta\rho\alpha^2 \quad (1)$$

gdzie:

$\Delta\rho$ – różnica gęstości, w przypadku metalu i fazy gazowej praktycznie $\Delta\rho = \rho_S$,
przy czym ρ_S jest gęstością metalu,

g – przyśpieszenie ziemskie,

α^2 – wyznaczone z empirycznego wzoru Portera [9] wyrażonego zależnością

$$\frac{\alpha^2}{x^2} = \left(\frac{h}{x}\right)^2 - 0,660\left(\frac{h}{x}\right)^3 \left[1 - 4,05\left(\frac{h}{x}\right)^2\right] \quad (2)$$

Bardziej szczegółowy, matematyczny opis algorytmu wyznaczającego wartości napięcia powierzchniowego i kątów zwilżania na podstawie analizy kształtu próbki przedstawiony został w [18].

Należy szczególnie podkreślić związek pomiędzy jakością segmentacji a dokładnością wyznaczenia właściwości powierzchniowych. Im lepsze odwzorowanie kształtu próbki na etapie segmentacji, tym dokładniejsze wyznaczenie jej parametrów geometrycznych, a w konsekwencji i właściwości powierzchniowych.

3. Segmentacja obrazów

Procedury segmentacji dzielą obraz na rozłączne obszary. W ich wyniku uzyskuje się wyodrębnienie fragmentów obrazu charakteryzujących się szczególnymi cechami (spełniających pewne kryteria jednorodności np. jasność, kolor, tekstura), od tła tj. obszarów niebędących przedmiotem analizy [19, 20].

3.1. Matematyczne podstawy segmentacji obrazów

Obraz $L_S(x, y)$ obszaru D rozpatrywanej sceny jest złożeniem obrazów występujących w niej obiektów i tła (3).

$$L_S(x, y) = H_1(x, y) + H_2(x, y) + \dots + H_s(x, y) + H_\varphi(x, y) \quad (3)$$

gdzie:

s – liczba obiektów w scenie,

$H_k(x, y)$ – obraz k -tego obiektu lub widocznej jego części ($k = 1, 2, \dots, s$),

$H_\varphi(x, y)$ – obraz tła.

Przy czym:

$$\left. \begin{aligned} H_k(x, y) &= 0 \quad \text{dla } (x, y) \notin D_k \\ H_\varphi(x, y) &= 0 \quad \text{dla } (x, y) \notin D_\varphi \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

gdzie:

$D_k \subset D$ – obszar k -tego obiektu,

$D_\varphi \subset D$ – obszar tła.

Dla obszarów obiektów D_k i obszaru tła D_φ spełnione są zależności (5).

$$D_1 \cup \dots \cup D_s \cup D_\varphi = D \quad \text{oraz} \quad D_i \cap D_j = 0 \quad \text{dla} \quad i \neq j \quad (5)$$

Zadanie segmentacji obrazu można przedstawić jako uformowanie z obrazu $L_s(x, y)$ obrazów obiektów $H_1(x, y), H_2(x, y), \dots, H_s(x, y)$ i obrazu tła $H_\varphi(x, y)$, dla których spełniona jest zależność (4).

W celu przedstawienia wejściowego obrazu w postaci (3), wystarczy zdefiniować odwzorowanie

$$\pi: D \rightarrow \{0, 1, \dots, s\} \quad (6)$$

spełniające następujące warunki

$$\pi(x, y) = \begin{cases} l & \text{dla } (x, y) \in D_l \\ 0 & \text{dla } (x, y) \in D_\varphi \end{cases}, \quad \text{gdzie } l \in \{1, 2, \dots, s\} \quad (7)$$

Odwzorowanie (6) można rozumieć jako regułę przyporządkowującą każdemu punktowi obrazu $(x, y) \in D$ jednoznacznie określającą go etykietę $\pi(x, y)$. Przy czym różne wartości etykiet przypisywanych punktom obrazu odpowiadają obszarom różnych obiektów lub obszarowi tła.

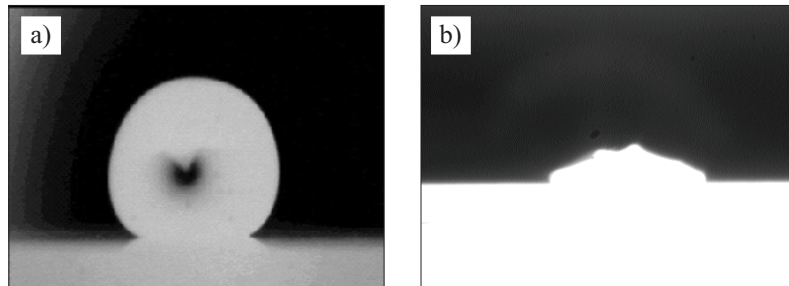
Ostatecznym wynikiem segmentacji jest rozłożenie obszaru zarejestrowanej sceny D na obszary obiektów $D_1 \dots D_s$ i obszar tła D_φ [21].

3.2. Analiza znanych metod segmentacji

Techniki segmentacji rozwijane są głównie pod kątem przydatności do konkretnych zastosowań. Prace nad algorytmem segmentacji obrazów pozyskanych w trakcie procesu pomiarowego poprzedzono więc analizą głównych grup metod segmentacji. Wynikiem analizy był wybór algorytmów potencjalnie przydatnych w rozważanej aplikacji. Z uwagi na dużą złożoność obliczeniowo-czasową, na wstępie odrzucono obszarowe metody segmentacji [19, 20, 22, 24]. Również algorytmy segmentacji poprzez wyszukiwanie wzorca [19, 20, 24] z góry uznano za mało przydatne, głównie z uwagi na temperaturową zmienność kształtów obiektów znajdujących się w analizowanej scenie.

Ponieważ analizowane obrazy zawierają jasne obiekty na kontrastowym tle, szczególną uwagę postanowiono poświęcić metodom segmentacji poprzez progowanie oraz poprzez detekcję krawędzi.

W zależności od temperatury, obrazy uzyskane w trakcie procesu pomiarowego dzielą się na dwie grupy. Pierwszą grupę charakteryzują niskie wartości jasności \bar{L} i kontrastu σ , drugą – wysokie wartości wspomnianych wielkości. Przykładowe obrazy należące do obu grup pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Przykładowe obrazy uzyskane w trakcie procesu pomiarowego:
a) szkło, temp. 890°C, $\bar{L} = 76$, $\sigma = 82$; b) pallad, temp. 1550°C, $\bar{L} = 129$, $\sigma = 103$

3.3. Progowanie

Progowanie jasności jest podstawową metodą segmentacji obrazu. Polega na rozdzielaniu obiektów od tła. Segmentację poprzez progowanie można zdefiniować jako przekształcenie postaci

$$\pi: D \rightarrow \{0, 1\} \quad (8)$$

spełniające warunki

$$\pi(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{dla } (x, y) \in D_l \\ 0 & \text{dla } (x, y) \in D_\phi \end{cases}, \text{ gdzie } l \in \{1, 2, \dots, s\} \quad (9)$$

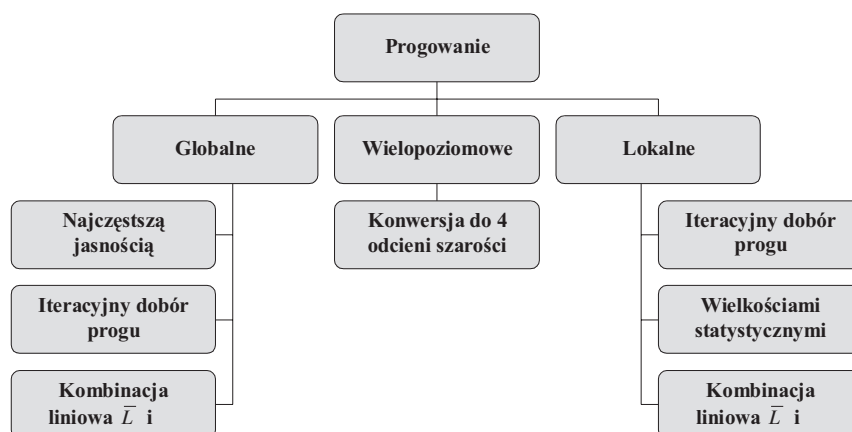
Odwzorowanie (8) można rozumieć jako regułę przyporządkowującą każdemu punktowi obrazu $(x, y) \in D$ jednoznacznie określającą go etykietę $\pi(x, y)$. Przy czym obiekty reprezentowane są przez wartość 1, natomiast tło przez wartość 0.

Przypisanie etykiet $\pi(x, y)$ odbywa się na podstawie porównania wartości pewnego atrybutu $Y(x, y)$ (np. jasności) z wartością progową T wyznaczoną na podstawie analizy właściwości obrazu lub jego fragmentu. Decyzja o przynależności punktu do danego obszaru podejmowana jest zgodnie z zależnością (10) [19, 20, 22].

$$\pi(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{dla } Y(x, y) \geq T \\ 0 & \text{dla } Y(x, y) < T \end{cases} \quad (10)$$

Kluczowym problemem w przypadku segmentacji poprzez progowanie jest sposób doboru wartości progowej. Próg może być dobierany globalnie (dla całego obrazu) lub lokalnie w zależności od właściwości określonego obszaru obrazu.

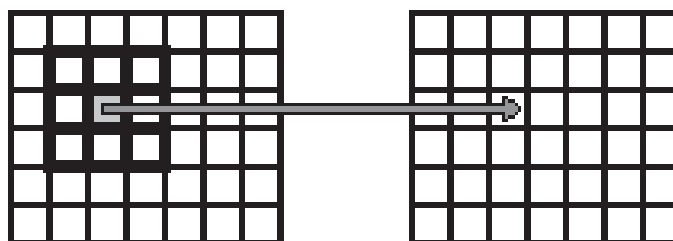
W trakcie przeprowadzonych badań nad algorytmem segmentacji dla zadanej klasy obrazów, zbadano różne warianty doboru progu (rys. 5). Wartość progową dobierano zarówno lokalnie, jak i globalnie.



Rys. 5. Zestawienie zbadanych metod doboru progu (\bar{L} – średnia jasność, σ – kontrast)

W przypadku globalnego doboru progu, ustalano jedną wartość progową dla całego obrazu. Dobór wartości progowej odbywał się na podstawie analizy właściwości całego obrazu.

W przypadku lokalnego doboru progu, wartość progową zdecydowano się ustalać na podstawie właściwości sąsiedztwa aktualnie analizowanego piksela. W celu wyznaczenia sąsiedztwa, zastosowano znany z filtracji liniowej mechanizm „przemiatania” obrazu maską [19, 20, 24]. Aktualnie analizowany piksel znajduje się w centralnym punkcie maski (rys. 6).



Rys. 6. Mechanizm lokalnego doboru progu

Zarówno dla globalnej, jak i lokalnej wersji progowania, zastosowano różne metody doboru progu. W większości przypadków, wartość progowa dobierana była głównie w oparciu o wielkości statystyczne (rys. 5).

W przypadku iteracyjnego doboru progu, zdecydowano się wykorzystać własną modyfikację tzw. algorytmu *isodata* [23], bazującego na średnich jasnościach tła i obiektu. Z uwagi na charakter analizowanych obrazów początkową wartość progu zmieniono z połowy zakresu jasności na wartość średnią \bar{L} .

Proces wyznaczania progu rozpoczyna się od policzenia średniej jasności \bar{L} obrazu, która w pierwszym kroku algorytmu przyjmowana jest jako początkowa wartość progu T_0 .

Następnie, dla tak ustalonego progu liczone są: średnia jasność tła L_T , średnia jasność obiektu L_O oraz nowa wartość progu T_k określona zależnością (11).

$$T_k = \frac{L_{Ok} + L_{Tk}}{2} \quad (11)$$

przy czym:

L_{Ok} – średnia jasność obiektu w kroku k ,

L_{Tk} – średnia jasność tła w kroku k ,

T_k – wartość progowa wyliczona w kroku k .

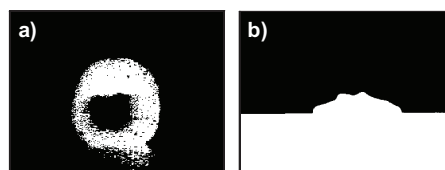
Proces obliczania wartości progowej powtarzany jest iteracyjnie do momentu, w którym wartości progu uzyskane w kroku bieżącym i poprzednim są jednakowe, czyli

$$T_{k-1} = T_k \quad (12)$$

Wyniki segmentacji przykładowych obrazów (rys. 4) z zastosowaniem omawianych algorytmów przedstawiono na rysunkach 7–13. Wszystkie wyniki opatrzone stosownymi komentarzami.

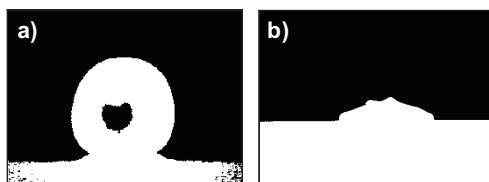
Metody doboru progu przedstawione na rysunkach 7–10 dały złe wyniki. W większości nie pozwoliły one na odwzorowanie kształtu obiektu w stopniu wystarczająco dokładnym. Jak widać na zamieszczonych poniżej obrazach, krawędzie obiektów są bądź nieregularne, bądź nie mają jednoznacznego przebiegu. Dodatkową wadą części algorytmów jest bardzo duża wrażliwość na nierównomierny rozkład jasności tła.

Metody, których wyniki przedstawiono na rysunkach 11–13, cechują się zbliżoną jakością. Dokładność odwzorowania kształtów obiektów w wyniku operacji progowania jest satysfakcjonująca i wystarczająca dla celów dalszej analizy ilościowej. Otrzymane obrazy prezentują obiekty o ciągłych, pozbawionych artefaktów, regularnych krawędziach. Dodatkowym atutem tych metod doboru progu jest brak ich wrażliwości na zakłócenia w obszarze tła.



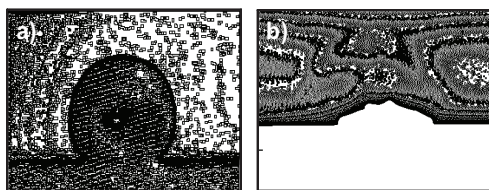
Rys. 7. Wyniki progowania globalnego z progiem równym najczęstszej jasności występującej w obrazie (rys. 4a i b)

Rysunek 7 przedstawia wyniki progowania globalnego przykładowych obrazów z progiem równym najczęstszej jasności występującej w obrazie. Metodę charakteryzuje brak uniwersalności. Satysfakcjonującą jakość wyników otrzymuje się jedynie dla obrazów o dużej jasności średniej i wysokim kontraście. W przypadku scen o niskich wartościach jasności i kontraście, nie jest możliwe nawet przybliżone określenie kształtu obiektu.



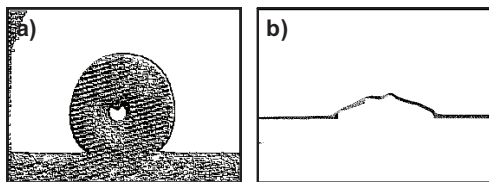
Rys. 8. Wyniki progowania globalnego z progiem równym kombinacji liniowej jasności średniej i kontrastu $T = k_1 \bar{L} + k_2 \sigma$ dla wartości współczynników $k_1 = 1$ i $k_2 = 1$

Progowanie globalne z progiem równym kombinacji liniowej jasności średniej i kontrastu (rys. 8) pozwala uzyskać dobre wyniki. Brak jest jednak jednoznacznych kryteriów określających, w jakich proporcjach jasność średnia i kontrast powinny wpływać na wartość progową. Lokalna wersja algorytmu cechuje się dodatkowo bardzo dużą wrażliwością na nierównomierny rozkład jasności w obszarze tła (rys. 9).

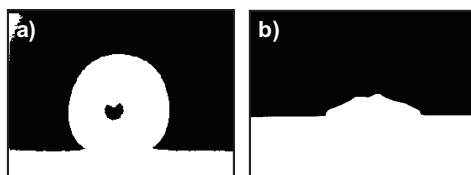


Rys. 9. Wyniki progowania lokalnego (dla obrazów z rys. 4a i b) z wartością progową równą kombinacji liniowej jasności średniej i kontrastu $T = k_1 \bar{L} + k_2 \sigma$ dla wartości współczynników $k_1 = 1$ i $k_2 = 1$. Wielkość otoczenia wyznacza maska o rozmiarze 3×3 . Wielkość maski wybrano eksperymentalnie

Bardzo duża wrażliwość na zakłócenia w obrębie analizowanej sceny jest również cechą algorytmu progowania lokalnego wielkościami statystycznymi (rys. 10). Ponadto, wyniki segmentacji zawierają obiekty o niejednoznacznych, grubych krawędziach. Grubość krawędzi wzrasta wraz ze wzrostem rozmiaru otoczenia.

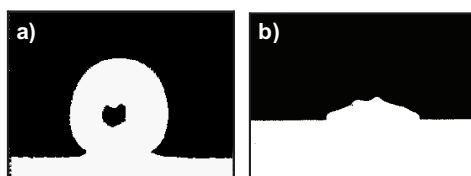


Rys. 10. Wyniki progowania lokalnego (dla obrazów z rys. 4a i b) z wartością progową równą medianie. Etap progowania poprzedzono procedurą wyrównywania nierównomiernego rozkładu jasności w obszarze tła. Wielkość otoczenia wyznacza maska o rozmiarze 3×3 . Wielkość maski wybrano eksperymentalnie



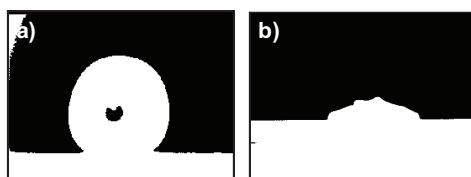
Rys. 11. Wyniki progowania globalnego z iteracyjnym doбором progu (dla obrazów z rys. 4a i b)

Algorytm progowania z iteracyjnym doбором progu zarówno w wersji globalnej (rys. 11), jak i lokalnej (rys. 12) daje satysfakcjonujące wyniki. Obydwie metody cechuje dokładność oraz niezależność od właściwości analizowanej sceny.



Rys. 12. Wyniki progowania lokalnego (dla obrazów z rys. 4a i b) z iteracyjnym doбором wartości progowej. Wielkość otoczenia wyznacza maska o rozmiarze 3×3 . Wielkość maski wybrano eksperymentalnie

Na szczególną uwagę zasługuje algorytm progowania wielopoziomowego. Metoda zakłada konwersję obrazu wejściowego do obrazu o czterech odcieniach szarości (0-85-160-255), a następnie progowanie obrazu z progiem T równym 85 dla obrazów o jasności średniej poniżej połowy zakresu jasności, oraz progiem T równym 255 dla pozostałych obrazów. Metodę charakteryzuje uniwersalizm. Otrzymane wyniki są dobre niezależnie od właściwości analizowanej sceny. Dodatkową zaletą algorytmu jest jego prostota oraz bardzo niska złożoność obliczeniowa rzędu $O(n)$. Wyniki segmentacji przykładowych obrazów z zastosowaniem algorytmu progowania wielopoziomowego przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Wyniki progowania wielopoziomowego (dla obrazów z rys. 4a i b)

3.4. Segmentacja poprzez detekcję krawędzi

Analizowane obrazy przedstawiają jasne obiekty na kontrastowym tle. W związku z tym, podjęto próbę przeprowadzenia segmentacji poprzez detekcję krawędzi. W tym celu wykorzystywane są najczęściej operatory gradientowe [19, 20, 24].

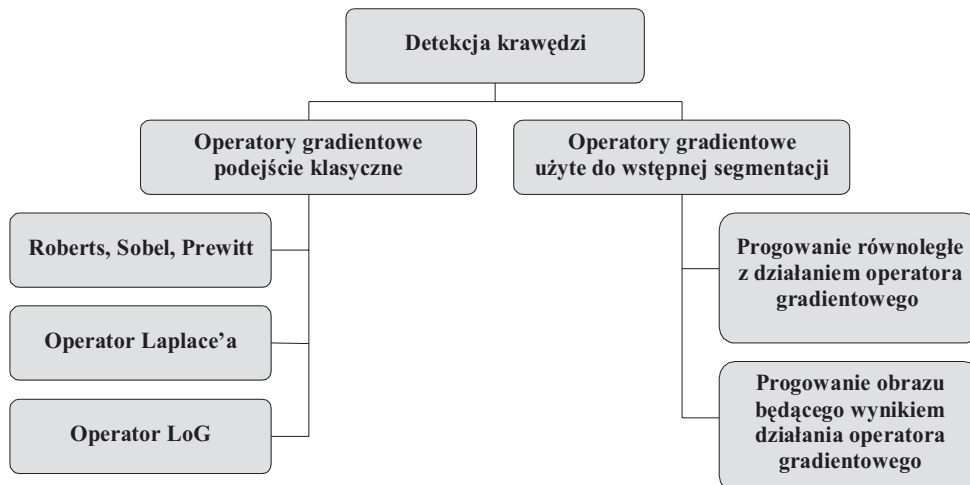
Segmentację poprzez detekcję krawędzi można zdefiniować jako przekształcenie postaci

$$\pi: D \rightarrow \{0, 1, \dots, s\} \quad (13)$$

spełniające warunki

$$\pi(x, y) = \begin{cases} l & \text{dla } (x, y) \in \partial D_l \\ 0 & \text{dla } (x, y) \notin \partial D_1 \cup \dots \cup \partial D_s \end{cases}, \text{ gdzie } l \in \{1, 2, \dots, s\} \quad (14)$$

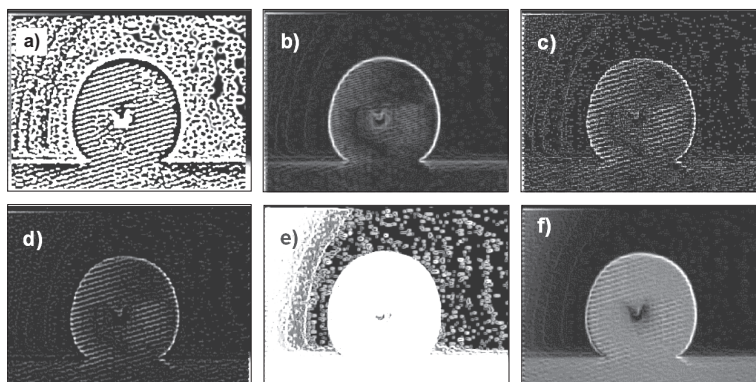
przy czym ∂D_l jest zbiorem punktów granicznych (krawędzią) spójnego obszaru D_l .



Rys. 14. Zestawienie algorytmów wykorzystujących operatory gradientowe

Rysunek 14 przedstawia zestawienie zbadanych metod, wykorzystujących operatory gradientowe. W pierwszej kolejności sprawdzono wyniki klasycznego podejścia do segmentacji poprzez detekcję krawędzi [19, 20, 23, 24]. Zastosowanie żadnego ze znanych operatorów gradientowych nie dało jednak zadowalających wyników (rys. 15). Opracowano więc nowe metody łączące w sobie cechy progowania oraz segmentacji poprzez detekcję krawędzi.

W wyniku powyższego rozumowania opracowane zostały dwa algorytmy segmentacji (rys. 14). Pierwszy z nich zakłada równoczesne działanie operatora gradientowego i mechanizmu progowania. Każdy z punktów, w których pochodna obrazu zmienia znak na przeciwny, jest poddawany progowaniu. Z uwagi na dużą złożoność obliczeniowo-czasową algorytmu oraz słabe wyniki jego szczegółowy opis pominięto.



Rys. 15. Wyniki segmentacji przykładowego obrazu (rys. 4a) z użyciem operatorów gradientowych: a) maski Marr-Hildretha; b) maski Sobela; c) operator Laplace'a; d) operator LoG; e) maski Frei-Chena; f) maski Kirsha

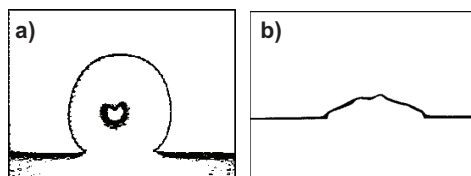
Drugi z opracowanych algorytmów wykorzystuje operator gradientowy do zgrubnej segmentacji, czyli wydzielenia tła, określenia obszarów, w których krawędzie na pewno nie występują. Procedura ta zdefiniowana może zostać jako przekształcenie postaci

$$\pi_z : D \rightarrow \{0, 1, \dots, t\} \quad (15)$$

Przekształcenie (15) spełnia dwa następujące warunki:

- 1) jeśli $\pi_z(x, y) \neq \pi_z(v, w)$, to punkty $(x, y), (v, w) \in D$, nie mogą jednocześnie należeć do obszaru jednego obiektu lub obszaru tła;
- 2) jeśli $\pi_z(x, y) = 0$, to $(x, y) \in D_\varphi$.

W następnym kroku algorytmu, wynik wstępnej segmentacji jest progowany. Do progowania używany jest algorytm z lokalnym, iteracyjnym doбором progu, opisany w poprzednim rozdziale. Wyniki algorytmu (w odniesieniu do przykładowych obrazów z rys. 4) przedstawiono na rysunku 16.



Rys. 16. Wyniki połączenia działania operatora gradientowego (maski Sobela) i mechanizmu progowania lokalnego. Obrazy oryginalne przedstawiono na rysunku 4

Autorska wersja algorytmu segmentacji obrazów poprzez detekcję krawędzi daje zdecydowanie dokładniejsze wyniki niż podejście klasyczne. W efekcie przedstawionego w artykule algorytmu otrzymuje się wyraźne, ciągłe i jednoznaczne krawędzie odwzorowujące kształt obiektu w stopniu wystarczającym do dalszej analizy ilościowej.

4. Wnioski

W artykule przedstawiono analizę wyników segmentacji obrazów z zastosowaniem autorskich modyfikacji znanych z literatury algorytmów. Szczególną uwagę poświęcono segmentacji poprzez progowanie i detekcję krawędzi.

W większości analizowanych przypadków obrazy uzyskane w wyniku segmentacji z wykorzystaniem przedstawionych algorytmów zawierają obiekty o ostrych, wyraźnych, pozbawionych artefaktów krawędziach. Oddają one w stopniu wystarczającym dla celów dalszej analizy ilościowej geometrię obiektów znajdujących się w obrazach oryginalnych. W związku z tym, możliwe jest wykorzystanie opracowanych algorytmów segmentacji w układach optycznych systemów ilościowej analizy obrazów, a w szczególności w układzie wizyjnym stanowiska pomiarowego „Thermo-Wet”.

Literatura

- [1] Nicholas M.G. (ed.): *Joining of ceramics*. Chapman & Hall, London, UK, 1990
- [2] Pask J., Evans A. (ed.): *Surfaces and interfaces in ceramic and ceramic-metal systems*. Plenum Publishing Co., New York, USA, 1981
- [3] Matsunawa A., Ohji T.: *Role of surface tension in fusion welding*. Part III. Transactions of Japan Welding Research Institute, Vol. 13, 1984, 147–156
- [4] Dellannay F., Froyen L., Deruyttere A.: *The wetting of solids by molten metals and its relation to the preparation of metal-matrix composites*. Journal of Material Science, Vol. 22, 1987, 1–16
- [5] Baglin J.E.E.: *Thin film adhesion: new possibilities for interface engineering*. Material Science and Engineering, Vol. B-1, 1988, 1–7
- [6] Senkara J., Windyga A.: *Podstawy teorii procesów spajania*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1990
- [7] Mortensen A.: *Interfacial phenomena in the solidification processing of metal-matrix composites*. Material Science and Engineering, Vol. A-135, 1991, 1–11
- [8] Metcalfe A.G.: *Interfaces in metal-matrix composites*. Academic Press, New York, USA, 1981
- [9] Missol W.: *Energia powierzchni rozdziału faz w metalach*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1974
- [10] Adamson A.W., Gast A.P.: *Physical Chemistry of Surfaces*. Wiley-Interscience, New York, USA, 1997, Głuch P.: *Obudowa wlotów szybowych w trudnych warunkach górniczo-geo-logicznych na dużej głębokości*. Projekty – Problemy Budownictwo Węglowe, nr 6, t. 12, 1984, 239–245
- [11] Holtzer M., Retel K.: *Pomiar napięcia powierzchniowego ciekłych metali i stopów – przegląd metod oraz analiza wyników*. Inżynieria Materiałowa, nr 4 (99), 1997, 128–134
- [12] Fu K.S., Mui J.K.: *A Survey on Image Segmentation*. Pattern Recognition Letters, Vol. 13, 1981, 3–16
- [13] Haralick R.M., Shapiro L.G.: *Survey: Image segmentation techniques*. Computer Vision Graphics and Image Processing, Vol. 29, 1985, 100–132
- [14] Reed T.R., Du B., J.M.H.: *A review of recent texture segmentation and feature extraction techniques*. Computer Vision, Graphics and Image Processing, Vol. 57, 1993, 359–372
- [15] Sankowski D., Strzecha K., Jeżewski S., Senkara J., Łobodziński W.: *Computerised Device with CCD Camera for Measurement of Surface Tension and Wetting Angle in Solid-Liquid Systems*. 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC, Venice, Italy, 1999, 164–168
- [16] Sankowski D., Strzecha K., Jeżewski S.: *Digital image analysis in measurement of surface tension and wettability angle*. IEEE International Conference on Modern Problems in Telecommunication, computer Science and Engineers Training, Lviv, Ukraine, 2000, 129–130

- [17] Sankowski D., Senkara J., Strzecha K., Jeżewski S.: *Automatic investigation of surface phenomena in high temperature solid and liquid contacts*. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Budapest, Hungary, 2001, 1397–1400
- [18] Strzecha K.: *Zastosowanie przetwarzania i analizy obrazów w wysokotemperaturowych pomiarach własności fizykochemicznych wybranych materiałów*. Łódź, 2001 (rozprawa doktorska)
- [19] Gonzalez R.C., Woods R.E.: *Digital Image Processing*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2001
- [20] Pratt W.K.: *Digital Image Processing*. John Wiley & Sons, Los Altos, Kalifornia, 2001
- [21] Putiatin E., Awierun S.: *Obrabotka izobrażeni w robotjechnikje*. Maszynostrojenie, Moskwa, Rosja, 1990
- [22] Jähne B.: *Digital Image Processing*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2002
- [23] Young I.T., Gerbrands J.J., van Vliet L.J.: *Fundamentals of Image Processing*. The Netherlands at the Delft University of Technology, 1998
- [24] Tadeusiewicz R.: *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*. Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków, 1997

